

# 钢筋混凝土结构裂缝损伤状态模型建模方法与分析

周林仁, 欧进萍\*

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 提出了一种钢筋混凝土(RC)结构裂缝损伤状态模型的有限元建模方法. 基于弥散裂缝数值模型, 采用 ANSYS 中 APDL 实体建模技术, 通过调控单元应力应变关系矩阵来模拟裂缝开裂后的力学行为, 建立钢筋混凝土结构在含有稳定裂缝损伤情况下的状态模型. 作为数值算例, 分析了钢筋混凝土简支梁在不同开裂状态、不同开裂位置和多种阻尼工况下的静动力特性. 结果表明, 混凝土首次开裂对结构静动力特性影响最大, 已有裂缝的张开闭合对结构的影响较小. 简支梁的不利开裂位置集中在荷载响应较大的支座和跨中附近, 以支座处最为不利. 阻尼削弱钢筋混凝土梁的动态响应, 对结构影响机理复杂, 非线性明显. 上述分析验证了该裂缝损伤状态模型建模方法的合理性和有效性.

**关键词:** 钢筋混凝土结构; 裂缝损伤; 状态模型; 弥散裂缝模型; 有限元分析; 阻尼  
**中图分类号:** TU31      **文献标志码:** A

## 0 引言

混凝土是典型的各向异性材料, 其抗拉强度远低于抗压强度, 在较低的拉应力下就会出现裂缝, 因此, 大多数钢筋混凝土(RC)结构是带裂缝工作的. 众多不确定性因素使得对结构开裂位置和裂缝扩展路径的预测非常困难. 因此, 在实际工程中均采用定期人工检测的方法确定结构的开裂情况. 随着各种先进检测技术的发展和运用, 目前可以较方便地获取结构裂缝的三维空间信息. 如何把检测到的损伤信息实时合理地参数化到分析模型中去, 为结构健康诊断和安全评定提供准确的状态模型, 非常重要, 至少有以下两方面的重要意义: 一是按检测到的损伤信息实时更新分析模型, 可以建立基于检测时间点的状态模型, 分析和评估当前结构的工作状况, 为管理维护提供信息; 二是通过历史不同时间点的状态模型, 可以探究损伤演变和结构性能退化的规律, 为结构设计、安全评估和寿命预测提供依据.

以往大量研究主要聚焦裂缝的起裂和扩

展<sup>[1,2]</sup>, 以及通过裂缝的开展情况评估结构性能, 而对现存裂缝的力学行为及其对结构性能的影响研究较少. 由实验和工程检测经验可知, 裂缝一开裂就有一定的深度和宽度, 在此后较长时间内裂缝是稳定的, 只有遭遇较大的突变荷载时才会稳定扩展, 卸载后裂缝闭合, 由于遭遇超越历史最大荷载的概率越来越小, 此后裂缝扩展的可能性也越来越小, 往往是在现有开裂深度范围内做张开闭合的往复运动. 因此, 钢筋混凝土在正常工作情况下, 影响其性能的主要是现成裂缝, 建立和分析当前裂缝情况下的状态模型更有现实意义.

本文通过分析钢筋混凝土开裂机理和开裂后裂缝的力学行为及其对结构的影响, 采用有限元方法把已知的裂缝信息合理地参数化到分析模型中去, 分析裂缝对结构静动力特性的影响, 建立 RC 结构含裂缝损伤情况下的状态模型.

## 1 裂缝的基本理论分析

### 1.1 弥散裂缝模型

裂缝是 RC 结构主要非线性特征之一<sup>[3]</sup>. 混

收稿日期: 2010-12-01; 修回日期: 2012-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重点项目 50538020); “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ03B05).

作者简介: 周林仁(1982-), 男, 博士生, E-mail: hitsgszhou@gmail.com; 欧进萍\*(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

混凝土开裂和裂缝扩展是非常复杂的非线性过程,裂缝的数值分析一直是研究的热点.目前主要有3种裂缝模型:弥散裂缝模型、分离裂缝模型和断裂力学模型.混凝土裂缝模型分为3个区域:(1)真实裂缝区,即宏观可见裂缝,裂缝面处的材料和应力应变等均不连续;(2)裂缝开展区,即微裂缝区域(FPZ),存在许多微裂缝,应力应变在该区域仍是连续的;(3)非开裂区,认为材料是线弹性的.

弥散裂缝模型采用非线性开裂应变等效模拟裂缝,通过调整材料软化本构关系,满足断裂能守恒准则<sup>[4]</sup>.假设开裂后单元仍连续,把裂缝弥散成无数平行微小的裂缝分布到整个单元中,通过改变单元的应力应变关系矩阵实现开裂特征模拟.弥散裂缝模型计算时不需要增加节点或重新划分单元,计算效率高,应用广泛.

## 1.2 裂缝对结构力学性能影响分析

裂缝是RC结构最为常见的病害之一,对结构极为不利,轻则影响结构美观和使用,降低结构承载力和使用寿命,严重情况下可能引发结构突发性倒塌等重大事故.

本文重点分析现有的稳定裂缝对结构力学性能的影响,主要从以下几个方面进行分析:

### (1) 对刚度的影响

混凝土开裂使结构在裂缝面的应力应变不连续,但骨料间的咬合摩擦使裂缝面仍具有一定的传力能力,这种高度非线性的接触行为使其传力机理非常复杂.裂缝尖端区因材料进入塑性和微裂缝的发展使得应力应变关系与非开裂部分迥然不同.裂缝对结构刚度的影响是通过裂缝模型的应力应变关系来描述.

### (2) 对质量的影响

正常状态下结构的裂缝都不会太大,裂缝对结构质量的影响可忽略不计.

### (3) 对阻尼的影响

阻尼反映结构的耗能特性,裂缝会使结构的阻尼增大,影响结构耗能和振动能量的分布,可从两方面来考虑:①从构件整体阻尼来看,裂缝引起结构刚度矩阵的变化,会导致与刚度矩阵相关的阻尼矩阵发生变化;②从材料局部耗能来看,混凝土开裂必然经历了塑性段,材料的塑性得到发展,

材料阻尼增大,同时,裂缝面之间的咬合摩擦更能体现其耗能特性.

## 2 RC结构及裂缝的有限元分析方法

### 2.1 RC结构有限元建模

常用的RC结构有限元建模方法有两种:一是分离式模型,混凝土和钢筋各自采用不同的单元来建模,钢筋和混凝土之间的作用可以按分析需要采用弹簧单元、界面单元或直接刚性连接.二是整体式模型,认为混凝土和钢筋之间粘结非常好,无滑移,把混凝土和钢筋作为一个整体来考虑,钢筋的作用通过3个方向的配筋率分布到单元中去.

### 2.2 混凝土裂缝的模拟

2.2.1 单元本构关系 下面主要分析混凝土的应力应变关系矩阵 $D_c$ 及其对开裂的模拟.三维空间中应力应变关系如下:

$$\sigma = D_c \varepsilon \quad (1)$$

其应力应变关系矩阵 $D_c$ 必须满足对称性和正定性.未开裂的混凝土视为各向同性的线弹性材料, $D_c$ 是对称的.开裂后的混凝土视为正交各向异性材料,采用弥散裂缝模型,通过调整应力应变关系矩阵来模拟裂缝单元3个正交方向的张开和闭合. $D_c$ 的调整遵循如下原则:混凝土开裂后,与裂缝面正交的方向只能受压不能受拉,即受拉弹性模量为零,与之相关的两个正交方向的泊松比也为零.裂缝面之间由于骨料的咬合和摩擦,仍具有一定的抗剪能力,通过引入剪切模量折减系数 $\beta$ 来考虑裂面的剪力传递能力.裂缝单元单方向开裂时 $D_c$ 如下:

$$D_{cl}^0 = \frac{E}{1+\nu} \begin{pmatrix} \frac{R_i(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中： $R_i$  为一较小的实数，裂缝单元单方向闭合、两方向和三个方向张开与闭合的  $D_c$  与之类似，在此不再赘述。

2.2.2 关于  $\beta$  的取值  $\beta$  的取值与结构类型和受载情况有关，总的趋势是随着裂缝的张开而减小，取值介于  $0 \sim 1$ 。国内外学者提出多种裂缝面剪力传递系数模型。

AL-Manaidi 模型：

$$\beta = \frac{0.4}{\epsilon_{tm}^{cr} / (200 \times 10^{-6})} \quad (3)$$

式中： $\epsilon_{tm}^{cr}$  为开裂拉应变。

文献[5]中建议公式是

$$\beta = (\beta_0 - \beta_1) e^{-\alpha_2(\epsilon - \epsilon_1)} + \beta_1 \quad (4)$$

式中： $\beta_0$  和  $\beta_1$  分别为混凝土刚开裂和裂缝充分发展时的剪力传递系数， $\alpha_2$  为常数。

### 2.3 阻 尼

阻尼体现结构耗能能力。常用的阻尼理论有黏滞阻尼和复阻尼，以黏滞阻尼应用最广，大多数有限元分析软件均采用黏滞阻尼模型。广泛研究的传统阻尼模型是整体意义上的阻尼特性<sup>[6,7]</sup>，有限元分析中单元层次的阻尼研究较少，文献[8、9]对单元层次的阻尼建模方法做了研究和探讨。

有限元中对各种阻尼的考虑因分析方法而异。静力分析、无阻尼模态分析和屈曲分析不计阻尼，而谐响应分析、瞬态分析、有阻尼模态分析和谱分析等可以分析阻尼，详见表 1。有限元分析通过形成阻尼矩阵来考虑各种阻尼的影响，其一般表达式如下：

$$\mathbf{C} = \gamma \mathbf{M} + (\lambda + \beta_c) \mathbf{K} + \sum_{j=1}^{N_m} \left[ \left( \beta_j^m + \frac{2}{\Omega} \beta_j^s \right) \mathbf{K}_j \right] + \sum_{k=1}^{N_c} \mathbf{C}_k + \mathbf{C}_\xi \quad (5)$$

式中： $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为阻尼矩阵、质量矩阵和刚度矩阵； $\gamma$ 、 $\lambda$  为瑞利阻尼系数； $\beta_c$  为可变刚度矩阵因子； $N_m$  为材料阻尼的数目； $\beta_j^m$ 、 $\beta_j^s$  是与材料  $j$  相关的刚度矩阵因子和模态阻尼因子； $\Omega$  为谐响应分析中的激振频率； $\mathbf{K}_j$  为与材料  $j$  相关的刚度矩阵； $\mathbf{C}_k$  和  $N_c$  是具有阻尼特性单元的阻尼矩阵和单元数量，例如弹簧单元、超单元和流体单元等； $\mathbf{C}_\xi$  是结构模态阻尼。

式(5)清晰地体现了阻尼矩阵中如何计入不

同的阻尼成分，既有结构整体意义的阻尼，例如瑞利阻尼、模态阻尼，也有局部单元层次上的阻尼，例如常材料阻尼和单元阻尼。结合表 1，分析中可方便地考虑阻尼影响。

表 1 有限元中不同分析方法对阻尼的考虑  
Tab. 1 Analysis of damp in finite element method

分析方法		瑞利 阻尼	材料 阻尼	常阻 尼比	模态 阻尼	单元 阻尼	常材料 阻尼
模态分析	Damped	Yes	Yes	No	No	Yes	No
	Full	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes
	Reduced	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
谐响应 分析	Mode Sup	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	Full	Yes	Yes	No	No	Yes	No
	Reduced	Yes	Yes	No	No	Yes	No
瞬态分析	Mode Sup	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
	MPRS	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
	DDAM	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
谱分析	PSD	Yes	No	Yes	Yes	No	No
	子结构分析	Yes	Yes	No	No	Yes	No

注：Yes 表示该分析方法可以考虑相应的阻尼，No 表示不考虑

### 3 RC 结构裂缝损伤有限元状态模型

RC 结构含裂缝损伤的状态模型主要考虑如何把已知的裂缝信息参数化到有限元模型中，合理地体现裂缝对结构力学性能的影响。

ANSYS 有限元软件中通过定义 Solid65 单元和采用弥散裂缝模型可以实现混凝土压碎和开裂，但计算中存在众多问题：(1)在某一级荷载作用下，容易出现相邻的多个单元的主拉应力同时超过抗拉强度，使得原本应该产生一条裂缝却出现相邻的一片单元都开裂的现象；(2)在较大荷载或多次加载卸载的作用下，混凝土过早地出现多方向开裂。这些现象与工程实际和实验都严重不符，也给有限元分析增加困难，往往导致计算不收敛。

本文提出一种针对单元的迭代控制建模方法。为了实现裂缝的三维空间信息，采用实体单元建模，开裂处的裂缝单元采用正交各向异性材料，其他单元采用各向同性的线弹性材料。采用 ANSYS 中二次开发的 APDL 编程，基于弥散裂缝模型理论，通过调整单元应力应变关系矩阵来模拟和控制裂缝开裂、张开、闭合和裂缝面剪力传递能力的状态。基于裂缝单元的应变状况来确定

裂缝的开裂状态,主要通过循环迭代计算,由前一荷载步的裂缝单元的应变计算值,决定下一步计算中裂缝单元采用何种应力应变关系矩阵.该方法只针对开裂位置的单元进行特别处理,使得这些单元在计算分析中具有模拟裂缝的功能.优点是可以通过调整应力应变关系矩阵实现裂缝模型和开裂过程的精确控制,但需要迭代计算,当存在多个方向开裂时,迭代控制的计算量较大.

#### 4 数值算例

基于本文提出的 RC 结构含裂缝损伤的有限元建模方法,对一钢筋混凝土简支梁进行有限元分析,梁和裂缝的具体参数如下:梁长 3 m,矩形截面,两端简支,C30 混凝土,梁底部配筋 3 $\phi$ 16,顶部配筋 2 $\phi$ 16,梁通长配矩形箍筋  $\phi$ 8@150 mm.保护层厚 25 mm.贯穿裂缝的深度为 1/2 梁高,裂缝单元占总单元数量的 0.366%.在梁跨中顶面节点施加集中荷载. RC 简支梁有限元模型如图 1 所示.

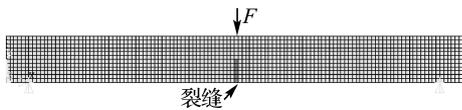


图 1 钢筋混凝土简支梁有限元模型

Fig. 1 The FE model of RC simply-supported beam

##### 4.1 模型状态量的选取和裂缝状态控制

状态模型可分为静力和动力两种.静力模型主要通过荷载-位移曲线反映结构的承载能力,通过静力非线性分析求解.动力模型主要考虑结构的模态参数和耗能性能,通过模态分析和瞬态分析求解.

本文主要分析已知裂缝在没有新的扩展情况下对结构的影响.现存裂缝主要有闭合和张开两种状态.对于受压闭合的裂缝,裂缝具有各方向完整的传力特性,裂缝单元与非开裂单元的本构关系完全相同;裂缝受拉即会张开,垂直于裂缝面方向的抗拉和抗压能力完全消失,裂缝面的抗剪能力采用折减的剪力传递系数  $\beta$  来表示.相关研究表明  $\beta$  与结构类型、材料属性和历史受载情况等有关,总的趋势是随着裂缝的张开而减小,取值介于 0~1.本文为了简化计算, $\beta$  的大小取决于裂缝

张开应变,具体取值情况如下:

$$\beta = \begin{cases} 1; & \epsilon_{\text{nn}}^{\text{cr}} \leq 0.4\epsilon_u \\ \frac{0.4}{\epsilon_{\text{nn}}^{\text{cr}}/(200 \times 10^{-6})}; & 0.4\epsilon_u < \epsilon_{\text{nn}}^{\text{cr}} \leq \epsilon_u \\ 0.4; & \epsilon_u < \epsilon_{\text{nn}}^{\text{cr}} \leq 10\epsilon_u \\ 0; & \epsilon_{\text{nn}}^{\text{cr}} > 10\epsilon_u \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_u$  为混凝土极限开裂应变.有限元计算中采用迭代控制,通过提取上一步裂缝单元的计算结果,调整裂缝单元的关系矩阵用于下一步计算.

##### 4.2 静力分析

对相同尺寸的普通混凝土梁、无裂缝和有裂缝的 RC 梁进行静力分析,在跨中施加集中荷载,提取梁的跨中位移,力-位移关系如图 2 所示.从图可以看出,裂缝对梁刚度有明显的削弱,对普通混凝土梁刚度的削弱远大于钢筋混凝土梁,体现了配筋能提高梁的刚度,抑制裂缝的开展.裂缝的张开和闭合是一个非线性过程,但由图 2 可见有裂缝情况下的力-位移关系与无裂缝情况很相似,几乎是线性,原因主要有两个:(1)混凝土由完好到开裂这一过程,尤其是在极限拉应变附近,有很强的非线性,其中材料的非线性占相当大的比例.开裂后,裂缝范围内的张开闭合不考虑材料非线性,主要是裂缝面之间的咬合摩擦,这些非线性所占比重小,在静力分析中就更不明显.(2)裂缝单元数量少,仅占单元总数的 0.366%,因此,非线性特征在构件的整体特性中很难体现.

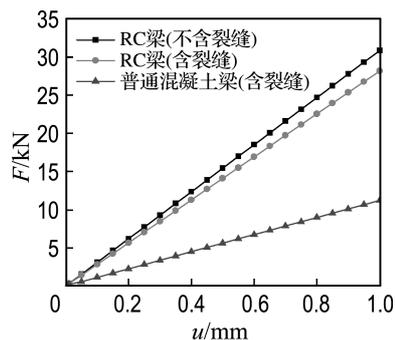


图 2 力-位移曲线

Fig. 2 Force-displacement curves

确定混凝土结构最不利开裂位置非常重要,对这些裂缝需要进行重点检查和修护.本算例中,通过改变裂缝位置,分析梁在集中荷载作用下跨中位置力-位移关系.图 3(a)是不同裂缝位置时,

某一集中力作用下的跨中位移,可以看出,当裂缝位于支座和跨中附近时位移最大,支座附近时的位移稍大于跨中.图3(b)是不同裂缝位置情况下,力-位移关系一次多项式( $y=kx+b$ )拟合的一次项系数  $k$ ,反映梁的刚度.可以看出,支座和跨中附近的系数较小,而以支座处最小.由以上分析可知,简支梁不利裂缝位置在跨中和支座附近,以支座附近最为不利.

4.3 动力分析

在RC简支梁跨中设置贯穿裂缝,通过调整裂缝单元状态,分析RC梁在无裂缝、有裂缝和多种裂缝状态下的频率,结果见表2.从表可以看出,RC梁的初次开裂对频率的影响最大,最大降幅达3.3%.在随后裂缝张开过程中,频率随着裂缝的张开度增大而减小,但减幅不大.这是因为垂直于裂缝面方向的弹性模量对频率影响比较大,而抗剪模量对频率影响相对较小.同时,也可知裂缝对不同频率的影响也不相同,与裂缝在该阶振型中的位置有关,当裂缝处于振型最大位移附近时对该频率影响最大,而振型节点处影响最小.

混凝土双向开裂出现在裂缝交汇处和荷载效应非常复杂的地方,往往是在单向开裂的基础上产生的.对比分析裂缝单向开裂和双向开裂可以发现,单向开裂基础上的双向开裂对结构频率降

低影响很小,可忽略不计.生死单元法的频率竟大于 $\beta=0$ 的裂缝模型,造成该现象的原因可能是被“杀死”的单元质量为零,使得频率偏高.

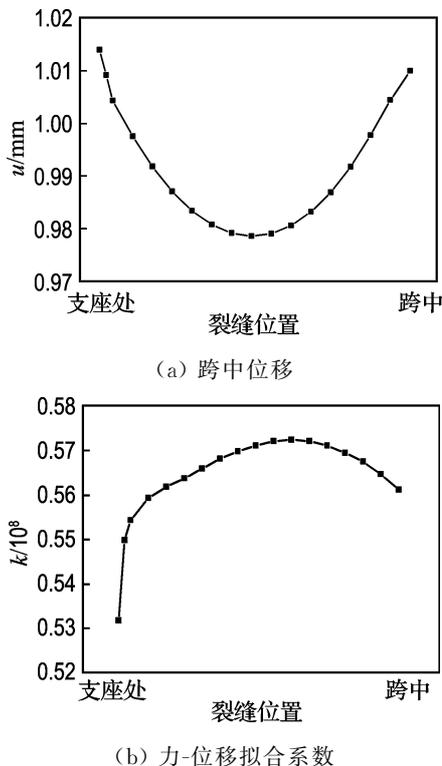


图3 不同裂缝位置的静力分析

Fig. 3 Static analysis with different crack locations

表2 RC梁不同裂缝状态下的自振频率(Hz)

Tab. 2 Natural frequency of RC beam with different crack conditions (Hz)

频率阶次	无裂缝	$\beta=1.0$		$\beta=0.4$		$\beta=0$		生死单元法
		单向开裂	双向开裂	单向开裂	双向开裂	单向开裂	双向开裂	
1	41.127	40.049	40.048	40.043	40.032	40.030	40.009	40.175
2	67.093	64.886	64.884	64.858	64.854	64.834	64.828	65.072
3	134.830	134.816	134.816	134.795	134.795	134.562	134.541	134.548
4	178.150	177.347	177.345	177.342	177.332	177.336	177.317	177.985
5	199.590	199.319	199.318	199.273	199.273	198.928	198.927	199.301
6	292.410	285.783	285.774	285.726	285.667	285.047	284.919	285.380

表3是裂缝不同张开程度下梁在正弦荷载作用下的瞬态分析.裂缝降低梁的刚度,使梁的位移响应增大,其中以第一次开裂(拉压模量为零)对梁的影响最大,位移幅值增大9.4%,随着裂缝的展开,裂面剪力传递能力的降低对位移幅值影响不大.

表3 裂缝不同剪力传递系数下的瞬态分析  
Tab. 3 Transient analysis on crack with different shear transfer coefficients

工况	剪力传递系数	位移响应幅值/mm
无裂缝梁	—	0.112 07
一次开裂	1.0	0.122 49
二次开裂	0.4	0.122 62
三次开裂	0	0.122 68

#### 4.4 考虑阻尼影响的稳态振动分析

4.4.1 瑞利阻尼 一般建筑结构在相当宽的频率范围内振型阻尼比基本不变,并以低阶振型为主.瑞利阻尼假设阻尼矩阵是刚度矩阵和质量矩阵的线性组合.已知任意两阶频率和振型阻尼比,可求得瑞利阻尼参数  $\alpha$  和  $\beta$ .对于刚度均匀的体系,取前两阶模态一般能获得合理的结果<sup>[10]</sup>.本文取 RC 梁前两阶频率和振型阻尼来计算瑞利阻尼,振型阻尼均取 1.5%.

4.4.2 材料阻尼 材料阻尼随应力幅值的增大呈非线性增长,不同应力幅值下的材料阻尼相差多达数十倍.结构不同振型的材料阻尼也不相同,高阶振型的材料阻尼大于低阶振型.RC 梁主要以低阶振型为主,应力幅值较低,其材料阻尼在 1.0%~2.0%<sup>[11,12]</sup>.裂缝单元的材料阻尼,由于其应力幅值很高,而且开裂使材料的塑性得到充分发展,裂缝面之间的摩擦更是大大增加其耗能能力,裂缝单元的材料阻尼可能会有更大数量级的增加.由于缺少理论研究和实验验证,裂缝阻尼如何取值几乎无文献可参考,所以,本文假设几组不同的阻尼值,研究裂缝阻尼对 RC 梁的影响,裂缝阻尼分别取 10%、30% 和 50%,通过设置裂缝单元阻尼的方式实现.

对 RC 梁进行多种工况下的瞬态分析,输入相同的正弦荷载,以无裂缝梁的位移响应幅值为基准,分析 RC 梁在整体阻尼、材料阻尼、裂缝局部阻尼和裂缝不同抗剪模量,及其不同组合下梁的稳态位移响应.表 4 分析了瑞利阻尼和材料阻尼这两种全局阻尼,可以看出阻尼使得梁位移响应减小,单独考虑一种阻尼时,材料阻尼影响远大于瑞利阻尼.各种阻尼对结构的影响是非线性的,不可线性叠加.

表 4 全局阻尼特性的瞬态分析

Tab. 4 Transient analysis on global damping property

工况	瑞利阻尼	材料阻尼	位移响应幅值/mm
1	No	No	0.112 07
2	Yes	No	0.111 04
3	No	1.5%	0.100 46
4	Yes	1.5%	0.100 12

表 5 分析裂缝单元的局部阻尼,梁的位移随

裂缝单元阻尼的增大而减小,体现了裂缝阻尼会减小梁动力响应的趋势,但由于算例中裂缝单元较少,阻尼的取值也无据可依,裂缝阻尼对梁位移响应的影响并不明显.如何真正体现裂缝单元的阻尼特性,尤其是阻尼的合理取值问题,有待进一步研究和实验验证.

表 5 裂缝局部阻尼特性的瞬态分析

Tab. 5 Transient analysis on local damping property of crack

工况	裂缝阻尼/%	位移响应幅值/mm
1	0	0.122 68
2	10	0.122 62
3	30	0.122 60
4	50	0.122 57

## 5 结 论

(1) 基于弥散裂缝模型,采用 ANSYS 中 APDL 实体建模技术,建立 RC 结构在含有稳定裂缝损伤情况下的有限元状态模型,通过调整单元关系矩阵模拟裂缝开裂后的力学特性,通过迭代计算,可以进行静动力和阻尼等力学特性分析.

(2) 裂缝的存在使 RC 梁的刚度明显降低,裂缝最不利位置出现在荷载效应较大的跨中和支座附近.混凝土初次开裂对结构影响最大,已有裂缝的张开闭合对结构影响相对较小.在单向开裂基础上发生的双向开裂对结构影响不大.RC 梁动位移幅值随裂缝单元阻尼的增大而减小.裂缝阻尼机理复杂,其阻尼特性和合理取值等问题,有待进一步深入研究和实验验证.

(3) 本文提出的 RC 结构裂缝损伤有限元状态模型建模方法,能较好地体现裂缝损伤对结构静动力特性的影响,可以推广到多种裂缝形式、多条裂缝和不同裂缝位置等情况,为结合工程检测信息,建立混凝土结构不同时间点的状态模型提供了一个可行方法.

## 参考文献:

- [1] INGRAFFEA A R, SAOUMA V. Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced concrete [C] // *Fracture Mechanics of Concrete*:

- Structural Application and Numerical Calculation.** Hingham: Martinus Nijhoff, 1984: 171-225
- [2] PETERSSON P E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R] // **Report No. TVBM-1006, Division of Building Materials.** Sweden: University of Lund, 1981
- [3] 何政, 欧进萍. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007
- [4] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂比较研究[J]. 工程力学, 2008, **25**(3): 80-84
- [5] 陆新征, 江见鲸. 考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(11): 70-74
- [6] BUHARIWALA K J, HANSEN J S. Construction of a consistent damping matrix [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1988, **16**(9): 931-942
- [7] LIANG Z, LEE G C. Representation of damping matrix [J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1991, **117**(5): 560-565
- [8] 董军, 邓洪洲. 结构动力分析阻尼模型研究[J]. 世界地震工程, 2000, **16**(4): 63-69
- [9] 淡丹辉, 孙利民. 结构损伤有限元建模中的阻尼问题研究[J]. 工程力学, 2006, **23**(9): 48-54
- [10] 李田. 结构时程动力分析中的阻尼取值研究[J]. 土木工程学报, 1997, **30**(3): 68-73
- [11] 尚世英, 董至仁. 钢筋混凝土构件阻尼值实验研究[J]. 工程抗震, 1993, **12**(4): 18-19
- [12] 石建军, 胡绍全, 柯国军. 钢筋混凝土材料阻尼值的实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, **29**(3): 14-15

## Modeling method and analyses for state model of reinforced concrete structure with crack damage

ZHOU Lin-ren, OU Jin-ping\*

( School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** A finite element modeling method of state model for reinforced concrete (RC) structure with crack damages is proposed. The crack damage state model is established through adjusting the stress-strain matrix of element to simulate the mechanical properties of existent crack based on the smeared crack model and APDL solid modeling of ANSYS. As an example, static and dynamic analyses of a RC simply-supported beam with crack damage are performed by finite element analysis, and the situations of several cracking states, different crack positions and some damp conditions are discussed. The experimental results indicate that the foremost cracking of concrete has the most significant impact on the static and dynamic characteristics of RC structures, and the influence of crack opening and closing under stable condition is mild. The most unfavorable crack positions are nearby the support and mid-span with support is worse. The damps weaken the dynamic response of RC structures, and the effect is complicated and high nonlinear. According to the above analyses, this method is reasonable and feasible.

**Key words:** reinforced concrete structure; crack damage; state model; smeared crack model; finite element analysis; damp